基于CMIP6模式的叶尔羌河流域未来水文干旱风险预估

向燕芸[1]，　王　弋[2]，　陈亚宁[3]，　张齐飞[4]，　张玉杰[1]

（1. 山西财经大学公共管理学院，山西 太原　030006；2. 华北电力大学水利与水电工程学院，北京　102206；
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830011；
4. 山西师范大学地理科学学院，山西 太原　030031）

摘　要：全球变暖导致干旱等极端事件频发，严重威胁生态安全和社会经济可持续发展，尤其是干旱区这一气候响应敏感区。本研究基于流域站点观测气象、水文等数据和第六次国际耦合模式比较计划（CMIP6）全球气候模式数据，应用分布式水文模型HEC-HMS模型，模拟并预估了塔里木河重要源流——叶尔羌河流域历史（1986—2014年）与未来（2015—2100年）径流变化趋势以及水文干旱风险。结果表明：（1）HEC-HMS模型在干旱区流域适用性较好，未来3个共享社会经济路径（SSPs）下叶尔羌河流域年径流和标准化径流指数（SRI）都将呈显著增加趋势（$P<0.1$），SRI上升速率约$0.13\sim0.27\cdot(10a)^{-1}$。（2）构建并对比了流域历史和未来时期4个干旱特征变量的边缘分布，未来干旱持续时间、干旱强度和烈度峰值都明显大于历史时期，干旱程度可能将不断加剧。（3）相较于历史时期，叶尔羌河流域未来水文干旱发生的联合概率将持续减小，且未来干旱事件的重现期都将有不同程度的延长。研究结果可为叶尔羌河流域水资源管理与规避水文干旱风险措施的制定提供科学参考。

关 键 词：水文干旱；风险预估；CMIP6；气候变化
文章编号：1000－6060(2024)05－0798－12(0798～0809)

全球气候变化加速了水循环，导致包括干旱在内的极端水文事件频发[1-3]，尤其是北半球中纬度地区[4-7]。与此同时，人口增长和农业、能源和工业部门的扩张等其他因素，预计将进一步加剧水资源短缺[8-9]，特别是在水资源匮乏的干旱地区。水文干旱是指由于降水的长期短缺而造成某段时间内地表水或地下水收支不平衡，出现水分短缺，使江河流量、湖泊水位、水库蓄水等减少的现象，其发生会对区域的农业、生态和社会经济发展产生重要的影响。相较于农业、气象等干旱，水文干旱特征更加复杂，所产生的后果也更为严重[10]。河流径流是干旱区最主要的水资源，维持着下游绿洲农业和荒漠生态系统的发展，水文干旱能更全面地反映以灌溉农业为主的干旱区的干旱情况，因此更需要在对未来径流过程进行可靠模拟与预测的基础上，进行流域未来水文干旱情况分析和预估[11]，以期为地区水资源有效的规划和管理提供科学有效的依据。

国内外学者对水文干旱做了大量研究，包括水文干旱指标的构建与特征变量的识别、水文干旱的形成机制、历史与未来水文干旱风险评估等，研究尺度包括流域尺度到全球尺度，技术方法日趋成熟。未来径流的模拟和预测是未来水文干旱风险分析的基础，而水文模型是研究流域径流过程的重要工具[12-13]。HEC-HMS是一种具有一定物理意义的分布式水文模型，旨在模拟流域尺度的降水-融雪径流过程，已被广泛使用。例如，Azmat等[14]将该

收稿日期：2023-10-01；　**修订日期：**2023-11-22
基金项目：国家自然科学基金项目(52161145102)；山西省高等学校科技创新项目(2022L270)资助
作者简介：向燕芸(1994-)，女，博士，讲师，主要从事干旱区水文过程研究. E-mail: xiangyy@sxufe.edu.cn
通讯作者：王弋(1977-)，女，博士，教授，主要从事气候变化与水文过程研究. E-mail: wangyi28@ncepu.edu.cn

模型应用于喜马拉雅山脉西部由冰雪融水补给的高海拔Jhelum河流域，并预测了未来气候变化情景下的径流量变化。未来径流的预测主要基于率定好的水文模型，通过全球气候模式获得的未来气候变化情景数据作为输入[15-17]。2012年秋，由世界气候研究项目“气候模拟工作组”组织的全球耦合模式比较计划第六阶段（CMIP6）正式启动，以共享社会经济路径（SSPs）为核心的新社会经济气候变化情景反映了辐射强迫与社会经济发展的关系，将成为IPCC最新报告的重要理论基础[18-20]。

叶尔羌河是塔里木河最长的支流，流域内全年降水稀少，下游荒漠生态系统与绿洲农业用水全部依赖于上游来水，上游径流补给来源主要为冰雪融水和山区降水，径流年际和年内变化大。受这一特殊的补给方式影响，流域水文过程对气候变化极为敏感，上游的水文格局对下游及塔里木河干流的来水和用水情况有很大的影响，而水文干旱对该区域的影响非常严重，尤其以3—5月的春旱最为严重。随着下游人口、耕地等的扩张，水资源需求更大，与此同时，气候变化引起的极端气候水文事件增多，势必会影响塔里木河流域水资源供需平衡，威胁整个塔里木河流域水安全。目前，已有学者对叶尔羌河流域历史时期水文过程及水文干旱特征进行了研究，但缺乏对未来时期水文干旱概率及风险的预估。本研究以塔里木河重要源流——叶尔羌河为研究区，应用分布式水文模型HEC-HMS模型，结合6个CMIP6全球气候模式，选择其中的3个SSPs情景，估算了流域控制期（1986—2014年）和未来（2015—2100年）径流数据，进一步计算标准化径流指数（SRI）作为未来水文干旱评价指标，借助游程理论和多维Copula函数，预估叶尔羌河流域在未来不同SSPs情景下各个水文干旱特征变量的变化趋势，以及不同情景下联合干旱概率以及重现期，为政府和相关部门应对气候变化，制定相应的水资源管理措施，更好地服务于“一带一路”建设提供科学依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

叶尔羌河流域（76°40′~79°25′E，37°20′~40°10′N）位于塔里木河流域西南，发源于喀喇昆仑山，流域

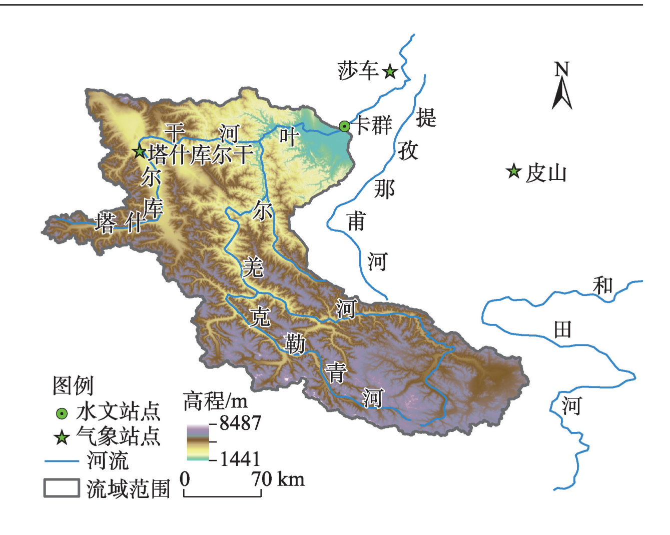


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

出山口以上集水面积46704 km²，平均海拔4400 m，是塔里木河最长的源流[21-22]（图1）。叶尔羌河流域位于典型的内陆干旱气候区，在河流的上游山区发育着现代冰川和永久积雪。出山口以上流域内冰川面积5852.57 km²，占流域面积的11.95%，积雪面积约占流域面积的15%[21]。流域主要由冰雪融水补给，径流量年际变化较大，且受气候变化影响显著[23]。叶尔羌河下游灌区是新疆最大的农业灌区，是新疆乃至全国最重要的优质粮、棉、果品生产基地[18]，流域上游来水在径流供给、维持下游生态安全和社会经济发展等方面至关重要。

1.2　数据来源与处理

本研究选取的历史时期气象数据为站点观测数据，数据来自中国国家气象中心的中国地面国际交换站气象资料日值数据集，包括温度、降水、相对湿度等，用于水文模型的构建和率定；历史时期水文数据来自叶尔羌河流域出山口水文站卡群站观测的日径流数据。

用于预测的气象数据来自CMIP6的6个全球气候模式（BCC-CSM2，CNRM-CM6-1，CNRM-ESM2-1，GFDL-ESM4，MPI-ESM1-2-HR，MRI-ESM2-0）输出的日尺度温度、降水等数据，用于预估研究区未来气候和径流变化。气候模式数据时间尺度为1986—2100年，其中1986—2014年为控制试验期，2015—2100年为预估期，选取了SSP126、SSP245和SSP370 3个SSPs。数据空间分辨率都为250 km，为了减小CMIP6全球气候模式数据的不确定性，本研究选择Gauss-

ian分布映射方法(DM)和局部强度缩放方法(LOCI)分别对温度和降水进行降尺度处理和偏差校正,这2种校正方法已被证明能很好地应用于该流域的气候模式数据校正[24]。需要指出的是,由于CMIP6气候模式数据中控制实验期为1986—2014年,故本研究选取的气象和水文观测数据时间序列为1986—2014年,用于对比验证气候模式数据的适用性。

1.3 研究方法

1.3.1 水文模型 HEC-HMS模型是美国陆军工程兵团水文工程中心(HEC)开发的流域水文模拟系统(HMS),是一个具有物理概念的分布式水文模型。模型输入数据包括温度、降水、蒸散发、地下水和土壤含水量等,模型中的融雪模块采用温度指数法来估算积雪的积累和消融。通过对模型中7个模块共26个参数进行率定,得到最优模拟结果,详细模拟过程及参数见Xiang等[24]的研究。本研究选取无量纲的拟合优度系数纳什系数(NSE)、相对偏差(PBIAS)和决定性系数(R^2)3个指标对模拟结果进行评价。在水文模拟中,如果NSE>0.75、|PBIAS|<10%,可认为模拟效果非常好[25]。

1.3.2 水文干旱特征分析 本研究选取3个月尺度的SRI作为表征水文干旱程度的指标。参考前人研究[26],根据不同的SRI阈值,可以将水文干旱划分为4个等级(表1),本研究将干旱阈值设置为-0.5。

采用游程理论识别干旱事件的特征变量,包括水文干旱持续时间(Dd)、水文干旱强度(Ds)、水文干旱烈度(Di)和水文干旱烈度峰值(Dp)[27]。

1.3.3 水文干旱风险估算方法 Copula函数最初由Sklar提出并使用[28]。利用边缘分布和相关函数,Copula函数模型可以构建多维联合分布[29-30]。采用二维、三维对称型Archimedean Copula函数分析干旱特征变量之间的关系,构造干旱历时、干旱强度、干旱烈度和干旱烈度峰值的联合分布,将其作为评估干旱风险的指标(表2)。采用均方根误差(RMSE)和赤池信息准则(AIC)作为评价各种Copula函数拟合结果优劣的指标。

在水文分析中,常用重现期来度量风险的大小。重现期是指某随机变量的取值在长时期内平均多长时间出现一次[31]。假定X_1,X_2和X_3分别表示干旱事件中具有相关关系的特征变量序列,边缘分布函数为$u_1=F(x_1)$,$u_2=F(x_2)$,$u_3=F(x_3)$,干旱特征值的单变量重现期(T)表示为:

表1 水文干旱等级划分

Tab. 1 Classification of hydrological drought events

标准化径流指数(SRI)	干旱等级
(−1, −0.5]	轻度干旱
(−1.5, −1]	中度干旱
(−2, −1.5]	重度干旱
≤−2	极端干旱

表2 三维阿基米德Copula函数

Tab. 2 Symmetric Archimedean Copula functions

Copula函数	公式	参数范围
Gumbel	$\mathrm{Exp}\left(-\left((-\ln u_1)^\theta+(-\ln u_2)^\theta+(-\ln u_3)^\theta\right)^{1/\theta}\right)$	[1, ∞)
Frank	$-\frac{1}{\theta}\ln\left(1+\left(e^{-\theta u_1}-1\right)\left(e^{-\theta u_2}-1\right)\left(e^{-\theta u_3}-1\right)/\left(e^{-\theta}-1\right)^2\right)$	[1, 0), (0, 1]
Clayton	$\left(u_1^{-\theta}+u_2^{-\theta}+u_3^{-\theta}-2\right)^{-1/\theta}$	(0, ∞)

注:θ为Copula函数的参数;u_1、u_2、u_3为干旱变量的边缘分布函数。

$$T_1=\frac{E(L)}{1-F(x_1)},\ T_2=\frac{E(L)}{1-F(x_2)},\ T_3=\frac{E(L)}{1-F(x_3)} \quad (1)$$

式中:L为干旱事件发生的时间间隔(月);$E(L)$为干旱事件发生的平均时间间隔(月)。$E(L)=N/n$,其中N为干旱的时间序列长度(月);n为发生干旱事件的次数。

二维联合重现期可表示为:

$$T_{or}=\frac{N}{n\times P\left(X_1\geqslant x_1\cup X_2\geqslant x_2\right)}=\frac{N}{n\times\left\{1-C\left[F_{x_1}(x_1),F_{x_2}(x_2)\right]\right\}} \quad (2)$$

二维同现重现期可表示为:

$$T_{and}=\frac{N}{n\times P\left(X_1\geqslant x_1\cap X_2\geqslant x_2\right)}=\frac{N}{n\times\left\{1-F_{x_1}(x_1)-F_{x_2}(x_2)+C\left[F_{x_1}(x_1),F_{x_2}(x_2)\right]\right\}} \quad (3)$$

三维联合重现期可表示为:

$$T_{or}=\frac{N}{n\times P\left(X_1\geqslant x_1\cup X_2\geqslant x_2\cup X_3\geqslant x_3\right)}=\frac{N}{n\times\left\{1-C\left[F_{x_1}(x_1),F_{x_2}(x_2),F_{x_3}(x_3)\right]\right\}} \quad (4)$$

三维同现重现期可表示为:

$$T_{\mathrm{and}}=\frac{N}{n\times P\left(X_1\geqslant x_1\cap X_2\geqslant x_2\cap X_3\geqslant x_3\right)}$$
$$=\frac{N}{n\times\left\{1-F_{x_1}(x_1)-F_{x_2}(x_2)-F_{x_3}(x_3)+C\left[F_{x_1}(x_1),F_{x_2}(x_2)\right]+C\left[F_{x_2}(x_2),F_{x_3}(x_3)\right]+C\left[F_{x_1}(x_3),F_{x_2}(x_3)\right]-C\left[F_{x_1}(x_1),F_{x_2}(x_2),F_{x_3}(x_3)\right]\right\}} \quad (5)$$

式中：T_{or}为干旱要素的联合重现期(a)；T_{and}为干旱要素的同现重现期(a)；$P(\cdot)$为联合分布函数；$C\left[F_{x_1}(x_1),F_{x_2}(x_2)\right]$、$C\left[F_{x_1}(x_1),F_{x_3}(x_3)\right]$、$C\left[F_{x_2}(x_2),F_{x_3}(x_3)\right]$为二维联合分布函数；$C\left[F_{x_1}(x_1),F_{x_2}(x_2),F_{x_3}(x_3)\right]$为三维联合分布函数；$F_{x_1}(x_1)$、$F_{x_2}(x_2)$、$F_{x_3}(x_3)$为干旱要素的边缘分布函数。

2 结果与分析

2.1 HEC-HMS模型的率定与验证

选取2005—2010年的叶尔羌河流域出山口观测数据对HEC-HMS模型进行率定，并利用1986—2004年和2011—2014年2个时期的数据对模型进行验证(图2)。将流域模拟的日径流的时间序列与实测径流的时间序列进行比较，以NSE、R^2、PBIAS等参数作为评价模拟效果的指标(表3)。从图2和精度验证结果中可以看出，该模型无论是在率定期还是在验证期都表现良好，率定期和验证期的NSE分别为0.80、0.72和0.83，R^2值分别为0.81、0.70和0.85，总体上可以较好地模拟研究区的径流过程。

2.2 叶尔羌河流域未来流量变化趋势预估

利用HEC-HMS模型模拟了历史与未来3个SSPs情景下径流变化(图3)。结果表明，未来3种SSPs情景下，叶尔羌河径流量在2015—2100年将显著增加($P<0.1$)。在不同SSPs情景下，未来径流的模拟结果存在一定的变化幅度差异，但所有情景下的径流未来变化趋势一致。具体而言，在SSP126、SSP245和SSP370情景下叶尔羌河流域流量将分别以0.58 $m^3\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$、1.23 $m^3\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$和2.21 $m^3\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$的速率增加。

2.3 叶尔羌河流域未来标准化径流系数的时间变化趋势

基于水文模型HEC-HMS模型和CMIP6气候模式数据模拟的叶尔羌河流域多年流量，计算未来(2015—2100年)不同SSPs情景下3个月尺度SRI的时间变化(图4)。研究发现，在未来3种气候情景下2015—2100年叶尔羌河流域上游的SRI均呈上升趋势($P<0.1$)，上升速率分别为$0.13\cdot(10a)^{-1}$、$0.21\cdot(10a)^{-1}$、$0.27\cdot(10a)^{-1}$。另外，未来3种气候情景下，叶尔羌河流域出山口SRI的最小值将分别出现在2037、2039年和2035年，SRI的最大值将分别出现在2064、2080年和2098年。

2.4 流域未来干旱特征变量的概率分布

为了更好地了解干旱事件的总体格局，直观地揭示历史和未来水文干旱事件的特征差异，采用小提琴图研究未来(2015—2100年)4个干旱特征变量

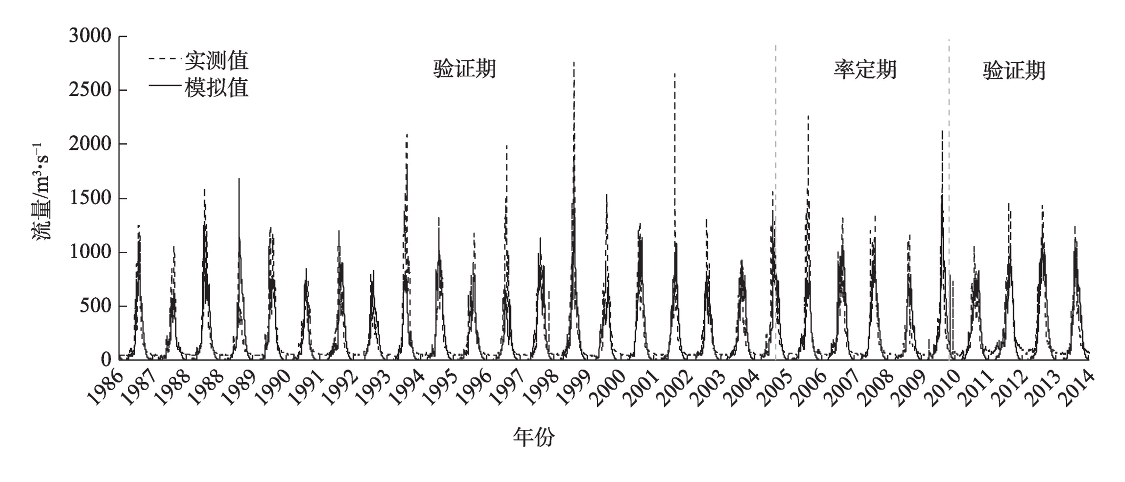


图2　叶尔羌河流域率定期(2005—2010年)和验证期(1986—2004、2011—2014年)实测值和模拟值

Fig. 2　Observed and simulated averaged hydrographs for the calibration period (2005—2010) and validation period (1986—2004, 2011—2014) of Yarkant River Basin

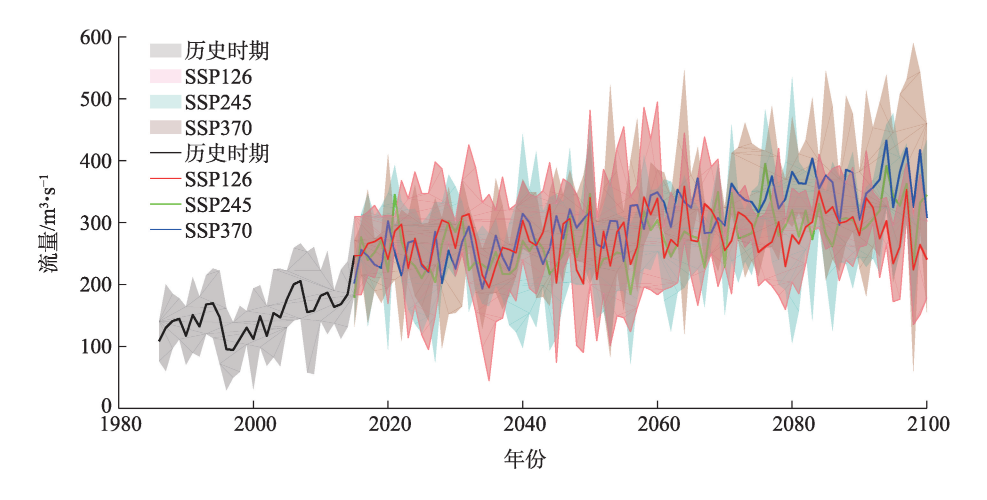
表3 HEC-HMS模型率定与验证精度分析

Tab. 3 Assessment of simulation results of the HEC-HMS model during the calibration and validation periods

时段	年份	NSE	PBIAS/%	R^2
率定期	2005—2010	0.80	5.86	0.81
验证期	1986—2004	0.72	16.56	0.70
	2011—2014	0.83	9.74	0.85

注:NSE为纳什系数;PBIAS为相对偏差;R^2为决定性系数。

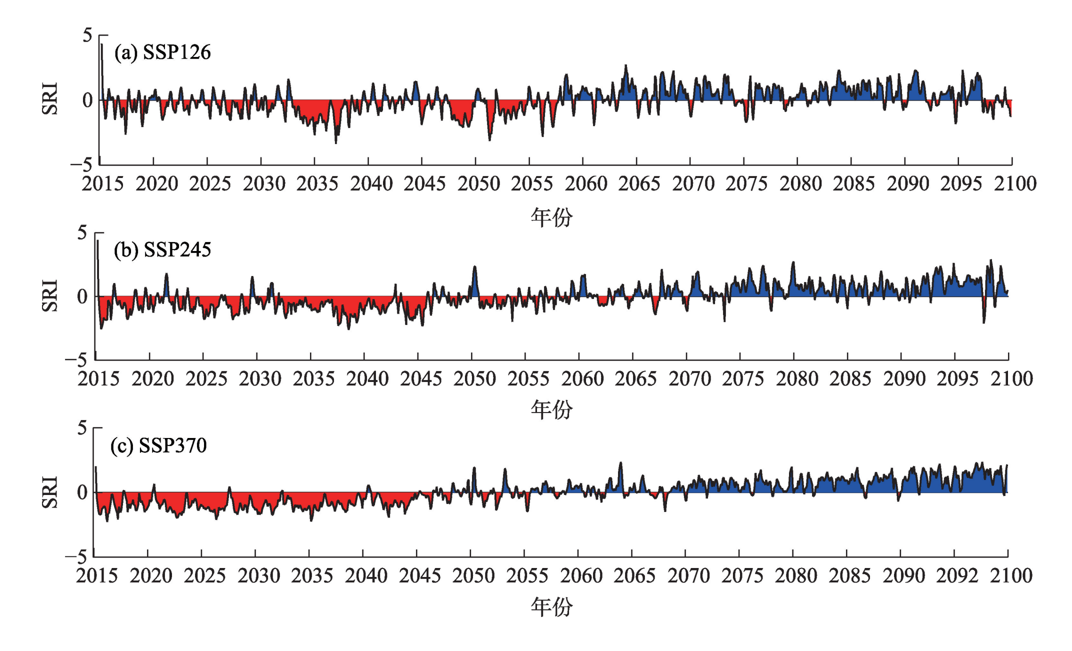
干旱持续时间、干旱强度、干旱烈度和干旱烈度峰值的分布特征。从图5中可以看出,叶尔羌河流域干旱持续时间和干旱强度的分布都比较分散,存在比较明显的离散值,干旱烈度和烈度峰值的分布比较集中;时间上看,与历史时期(1961—2015年)相比,叶尔羌河流域未来3个情景下各个干旱变量的均值和中位数基本都呈上升趋势,其中SSP126情景下未来时期的干旱烈度较为异常,这主要是因为这一时期存在几个长干旱历时且干旱峰值较大的干旱事件。干旱变量的变化趋势表明,从历史到未来时期,叶尔羌河流域干旱持续时间、干旱强度和烈度峰值都有明显上升,干旱程度可能将不断加剧。



注:SSP为共享社会经济路径。下同。

图3 1986—2100年叶尔羌河流域年径流变化趋势

Fig. 3 Variation trends of the annual runoff in Yarkant River Basin from 2015 to 2100



注:SRI为标准化径流系数;图中蓝色区域表示SRI>0,红色区域表示SRI<0。

图4 未来SSP126、SSP245、SSP370情景下叶尔羌河流域SRI变化趋势

Fig. 4 Variation trends of SRI in the Yarkant River Basin during future period under SSP126, SSP245 and SSP370 scenarios

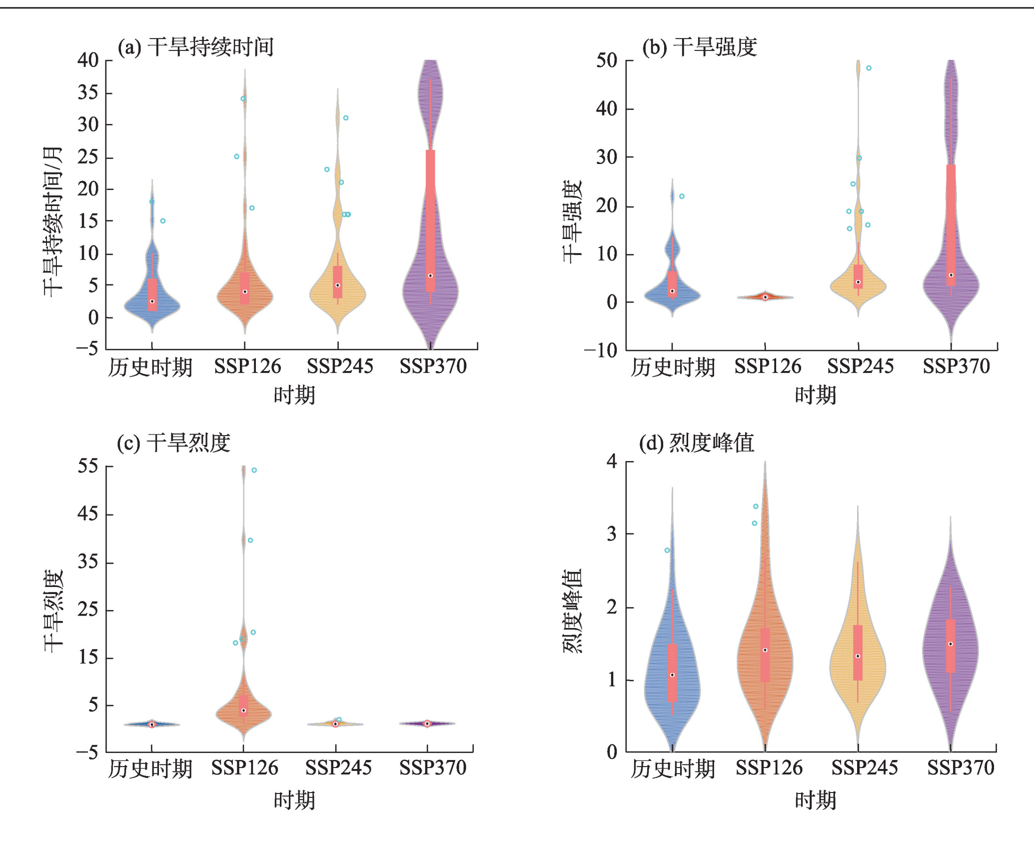


图5　历史和未来叶尔羌河流域干旱持续时间、干旱强度、干旱烈度及烈度峰值小提琴图

Fig. 5　Violin plots of the hydrological drought duration, drought severity, drought intensity and drought peak in Yarkant River Basin during historical and future periods

2.5　未来多变量联合干旱概率与重现期

单个干旱变量的分析不足以反映流域的干旱特征，难以对未来水文干旱发生的概率准确预测。为了精确预估未来叶尔羌河流域上游水文干旱发生的概率，评估未来水文干旱风险，本研究应用Copula函数，构建水文干旱二变量、三变量联合分布，对未来不同情景下2015—2100年叶尔羌河流域水文干旱的联合概率进行分析，从而准确地反映流域未来的水文干旱情况。根据拟合效果评估结果，叶尔羌河流域二维、三维Copula联合概率研究选择干旱持续时间、干旱烈度和烈度峰值3个变量联合效果最好，因此选择这3个变量分别构建相应的二维、三维Copula联合分布。

根据确定的最佳的Copula函数形式，估算了相对应的参数，构建了相应的二维、三维联合分布（表4）。研究发现，控制期（1986—2014年）和未来3个SSPs情景下，叶尔羌河流域干旱持续时间和干旱烈度的联合概率分别为0.37、0.46、0.35、0.37；干旱烈度和烈度峰值的联合概率分别为0.42、0.43、0.43、0.45；干旱持续时间和烈度峰值的联合概率分别为0.38、0.41、0.39、0.40；干旱持续时间、干旱烈度和烈度峰值的三维联合概率分别为0.3、0.37、0.31、0.35。

为探究未来不同情景下叶尔羌河流域水文干旱概率变化趋势，将未来不同SSPs情景下干旱持续时间、干旱烈度和烈度峰值的三维联合概率进行对比（图6）。结果显示，2015—2100年SSP126、SSP245和SSP370情景下水文干旱发生的概率都呈下降趋势，且3个情景下水文干旱事件发生的次数依次递减，干旱概率降低的速率依次递增，斜率分别为−0.001、−0.007、−0.030。

对识别的水文干旱事件进一步进行重现期分析，以研究叶尔羌河流域未来水文干旱的特征。给定单变量重现水平分别为2 a、5 a、10 a、20 a、50 a和100 a，通过计算单变量干旱特征值进而得到两变量、三变量联合分布的同现重现期与联合重现期（表5）。与历史时期重现期相比，叶尔羌河流域未来3个SSPs情景下，不同单变量重现期所对应的烈度峰值基本都低于历史时期，而干旱持续时间基本都高于历史时期。以单变量重现期为10 a为例，历史时期相对应的干旱持续时间和烈度峰值分别为

表4 二维、三维Copula函数拟合参数

Tab. 4 Fitting parameters of 2D and 3D Copula functions

时期	函数	参数	Dd&Di	Di&Dp	Dd&Dp	Dd&Di&Dp
控制期	Gumbel	θ	1.34	3.32	1.80	2.93#
		RMSE	0.12	0.09	0.11	0.05
		AIC	−52.38	−61.21	−55.18	−342.51
	Frank	θ	2.57#	13.42#	4.50#	9.41
		RMSE	0.12	0.08	0.11	0.05
		AIC	−52.45	−64.16	−54.99	−334.57
	Clayton	θ	0.30	3.50	0.53	3.85
		RMSE	0.13	0.09	0.12	0.06
		AIC	−50.84	−61.34	−54.42	−323.45
SSP126	Gumbel	θ	2.59	2.15	1.57	3.51
		RMSE	0.05	0.04	0.06	0.09
		AIC	−347.79	−381.25	−333.49	−264.46
	Frank	θ	11.14#	10.28#	4.80	12.08
		RMSE	0.04	0.03	0.04	0.10
		AIC	−375.28	−408.83	−360.19	−261.79
	Clayton	θ	0.05	0.08	1.94#	5.03#
		RMSE	0.14	0.11	0.04	0.09
		AIC	−226.00	−253.63	−362.21	−271.12
SSP245	Gumbel	θ	1.14	2.72	1.29	2.23
		RMSE	0.04	0.04	0.05	0.11
		AIC	−348.89	−334.98	−306.04	−231.66
	Frank	θ	1.86#	11.99#	2.89	6.44#
		RMSE	0.03	0.03	0.04	0.11
		AIC	−355.62	−349.88	−327.94	−232.54
	Clayton	θ	0.02	0.07	1.32#	2.45
		RMSE	0.04	0.13	0.04	0.12
		AIC	−331.18	−213.75	−339.59	−221.57
SSP370	Gumbel	θ	1.46	4.15	1.75	3.00
		RMSE	0.07	0.05	0.07	0.06
		AIC	−118.79	−138.45	−123.35	−130.76
	Frank	θ	4.39#	14.43	6.44#	9.97#
		RMSE	0.06	0.05	0.05	0.06
		AIC	−126.57	−136.16	−134.79	−133.06
	Clayton	θ	0.86	4.44#	1.16	4.00
		RMSE	0.07	0.04	0.07	0.06
		AIC	−120.65	−143.51	−119.68	−128.56

注：θ为Copula函数的参数；RMSE为均方根误差；AIC为赤池信息准则；Dd&Di、Di&Dp、Dd&Dp分别为干旱持续时间和干旱烈度、干旱烈度和烈度峰值、干旱持续时间和烈度峰值的二维联合概率；Dd&Di&Dp为干旱持续时间、干旱烈度和烈度峰值的三维联合概率；"#"表示该函数拟合效果最好。

5.36和1.93；未来时期在SSP126情景下，叶尔羌河对应的干旱持续时间和烈度峰值分别为5.89和1.73；SSP245情景下，对应的干旱持续时间和烈度峰值分别为5.21和1.86；SSP370情景下，对应的干旱持续时间和烈度峰值分别为9.84和1.57。总体而言，3个情景下干旱持续时间都大于历史时期，而烈度峰值都小于历史时期。换句话说，就10 a一遇的水文干旱事件而言，未来烈度峰值都预计将低于历

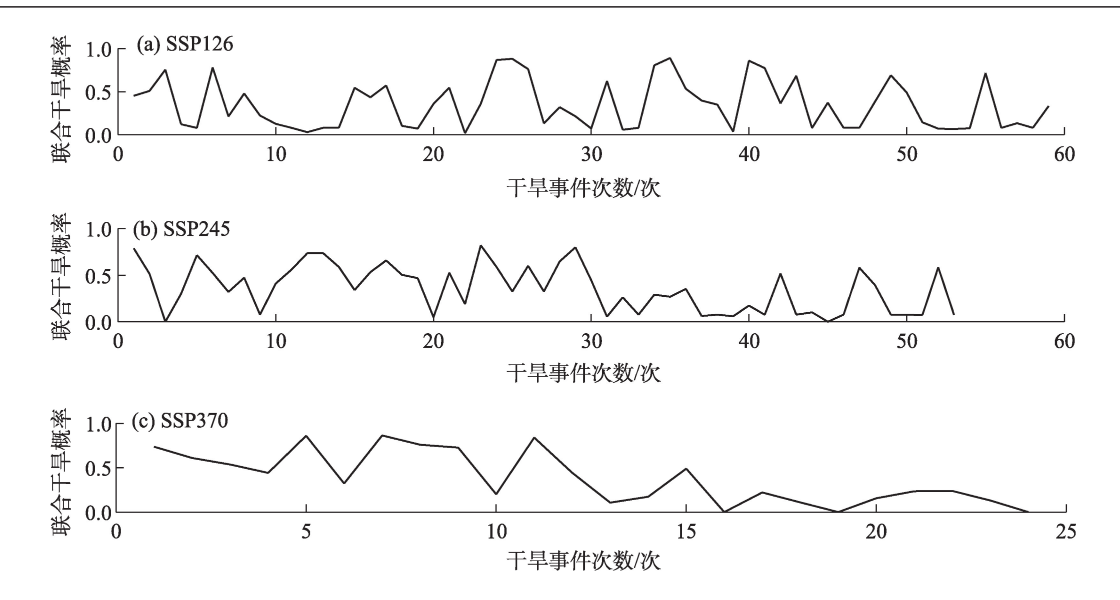


图6 叶尔羌河流域未来3个SSPs情景下三维联合干旱概率变化趋势

Fig. 6 Variation trends of 3D joint probability of droughts in Yarkant River Basin during future period under three SSPs scenarios

史时期，干旱持续时间预计将高于历史时期。

根据表5多变量联合重现期和同现重现期计算结果，结合本研究水文干旱等级划分标准可知：叶尔羌河未来3个SSPs情景下烈度峰值最小分别为1.01、0.9、0.61，都属于轻旱范围，以SSP126为例，当单变量重现期为2 a时，叶尔羌河流域Dd_Di、Di_Dp、Dd_Dp、Dd_Di_Dp的同现重现期分别为2.19 a、2.18 a、2.23 a、2.51 a，基本一致，可见发生持续2.29个月的轻旱事件的重现期约为2 a；当单变量重现期为5 a时，叶尔羌河干旱历时约为4.12个月，烈度峰值约为1.59，此时干旱持续时间和烈度峰值的同现重现期为9.17 a，可见叶尔羌河发生持续4.12个月的中旱事件的重现期约为9 a，与历史时期相比，发生中旱事件的重现期变长；同样地，单变量重现期为10 a时，历史时期叶尔羌河发生持续5.36个月的重旱事件的重现期约为19 a，未来发生持续5.21个月的重旱事件的重现期约为28 a；单变量重现期为20 a时，历史时期叶尔羌河发生持续7.59个月的极端干旱事件的重现期约60 a，而未来发生持续6.97个月的极端干旱事件的重现期约115 a。总体而言，与历史时期相比，叶尔羌河未来各类干旱事件的重现期都将有不同程度的延长。

3 讨 论

影响叶尔羌河流域水文干旱的因素较多，以自然因素为主，如温度、降水、蒸发和冰雪覆盖，人类活动对上游水文干旱的影响较小。另外，冰川对气候变化的响应存在滞后效应，尤其是大型冰川，且对于冰川年际变化的监测也存在一定困难。考虑到冰川的积累和消融也主要受降雪的影响，故通过对融雪的监测在一定程度上可以来表征冰川变化。为了评价自然要素对水文干旱（径流）的相对影响，本节选择了4个主要因子，即从Climatic Research Unit（CRU）数据中提取1961—2015年的年温度、降水量、蒸CRU域温度显著升高，降水量略有增加。温度升高导致山区径流增加，导致融雪和冰川融化[32]。叶尔羌河流域冰雪融水对河流径流的贡献在1961—2006年约为51.3%，2000年后增加到约63.3%，而降水补给仅占22%[33]。在以冰雪融化为主的流域，如叶尔羌河流域，径流受温度的影响大于受降水的影响。

对于干旱区而言，未来气候变化带来的降水增多是非常有限的，对叶尔羌河流域未来3个SSPs情景的气候变化预估结果显示，年降水预计将从历史时期的83 mm增加到未来的92~107 mm，相对增量最多仅20 mm[24]，温度升高引起的冰川积雪加速消融对水资源贡献率将高于降水对水资源的贡献率。对预测的未来时期不同SSPs情景下温度、降水和径流进行相关分析发现，SSP126情景下径流与降水相关系数（0.50）高于与温度的相关系数（0.49），而SSP245和SSP370情景下径流与温度的相关系数（0.74）高于与降水的相关系数（0.63），这一关系也

表5 叶尔羌河流域历史与未来时期重现期

Tab. 5 Return periods in Yarkant River Basin during historical and future periods

时期	干旱变量及相应重现期	单变量重现期(T)					
		2 a	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a
历史时期	Dd/月	2.18	3.85	5.36	7.59	10.00	12.58
	Di	0.81	1.07	1.24	1.42	1.56	1.67
	Dp	0.91	1.43	1.93	2.58	3.19	3.77
	(Dd_Di)T_{and}/a	2.09	5.91	14.02	37.17	82.25	161.24
	(Dd_Di)T_{or}/a	1.85	4.33	7.77	13.70	20.90	29.59
	(Di_Dp)T_{and}/a	2.41	8.33	23.89	76.49	190.98	405.30
	(Di_Dp)T_{or}/a	1.65	3.57	6.32	11.50	18.26	26.64
	(Dd_Dp)T_{and}/a	2.27	7.32	19.82	60.32	146.20	304.69
	(Dd_Dp)T_{or}/a	1.72	3.80	6.69	11.99	18.81	27.23
	(Dd_Di_Dp)T_{and}/a	2.51	9.40	30.61	122.88	391.81	1000.00
	(Dd_Di_Dp)T_{or}/a	1.68	3.56	5.92	9.84	14.64	20.41
SSP126	Dd/月	2.29	4.12	5.21	6.97	10.23	18.48
	Di	0.78	1.24	1.45	1.62	1.74	1.83
	Dp	1.01	1.59	1.86	2.15	2.50	3.02
	(Dd_Di)T_{and}/a	2.19	6.48	15.58	49.05	205.18	1562.50
	(Dd_Di)T_{or}/a	1.84	4.11	7.06	13.22	27.56	76.45
	(Di_Dp)T_{and}/a	2.18	6.35	15.08	46.79	192.96	1452.99
	(Di_Dp)T_{or}/a	1.85	4.16	7.17	13.39	27.79	76.73
	(Dd_Dp)T_{and}/a	2.23	9.17	28.39	114.86	582.87	5054.03
	(Dd_Dp)T_{or}/a	1.81	3.46	5.86	11.45	25.35	73.95
	(Dd_Di_Dp)T_{and}/a	2.51	9.20	24.57	82.12	346.75	2603.72
	(Dd_Di_Dp)T_{or}/a	1.86	3.51	5.44	9.45	18.92	51.44
SSP245	Dd/月	1.17	4.26	5.88	8.36	15.17	20.03
	Di	1.88	5.07	9.57	17.81	42.62	61.09
	Dp	0.90	1.40	1.73	2.08	2.63	2.88
	(Dd_Di)T_{and}/a	2.14	6.17	14.95	40.64	203.27	418.16
	(Dd_Di)T_{or}/a	1.88	4.31	7.67	13.51	31.19	44.92
	(Di_Dp)T_{and}/a	2.39	11.09	36.93	131.80	863.66	1909.51
	(Di_Dp)T_{or}/a	1.73	3.29	5.88	10.99	27.92	41.45
	(Dd_Dp)T_{and}/a	2.20	9.70	33.07	120.80	807.88	1794.67
	(Dd_Dp)T_{or}/a	1.84	3.43	5.99	11.07	27.98	41.50
	(Dd_Di_Dp)T_{and}/a	2.40	17.66	169.82	594.86	1161.75	2129.31
	(Dd_Di_Dp)T_{or}/a	1.74	3.41	5.63	9.46	21.15	30.27
SSP370	Dd/月	1.85	3.77	9.84	22.98	69.41	132.10
	Di	1.10	3.53	10.73	25.50	74.90	138.81
	Dp	0.61	1.12	1.57	1.89	2.25	2.44
	(Dd_Di)T_{and}/a	3.67	5.27	12.97	36.15	175.58	484.10
	(Dd_Di)T_{or}/a	3.65	4.71	8.08	13.74	29.96	49.36
	(Di_Dp)T_{and}/a	3.71	5.18	10.82	23.67	79.29	179.41
	(Di_Dp)T_{or}/a	3.61	4.79	9.21	17.18	37.80	59.70
	(Dd_Dp)T_{and}/a	3.72	5.72	13.71	36.16	163.15	435.11
	(Dd_Dp)T_{or}/a	3.59	4.40	7.81	13.73	30.36	49.93
	(Dd_Di_Dp)T_{and}/a	3.71	5.42	13.95	40.72	206.81	567.91
	(Dd_Di_Dp)T_{or}/a	3.59	4.35	7.65	12.87	25.64	39.51

注：Dd、Di和Dp分别为干旱持续时间、干旱烈度和烈度峰值；T_{and}为干旱特征变量的二维或三维同现重现期；T_{or}为二维或三维联合重现期。

在其他干旱区流域如塔里木河流域也得到了证明[34]。叶尔羌河下游无产流能力，下游绿洲生态系统和灌区农业用水全部依赖于上游山区来水，虽然生态坝的建设有利于生态水的输送，可以在一定程度上减少干旱灾害的威胁[35]，但水文干旱比其他自然灾害更频繁地影响着下游及整个塔里木河流域的生态环境和人类活动[18,32]。水文干旱对干旱区流域生态和社会经济发展的威胁最大，对水文干旱的研究更加具有现实意义。

4 结 论

（1）HEC-HMS模型能够较好地应用于叶尔羌河流域，在未来3个SSPs情景下，2015—2100年叶尔羌河流域径流将显著增加（$P<0.1$），叶尔羌河流域上游的SRI也均呈显著上升趋势（$P<0.1$），上升速率分别为$0.13\cdot(10a)^{-1}$、$0.21\cdot(10a)^{-1}$、$0.27\cdot(10a)^{-1}$。

（2）就水文干旱特征变量而言，与历史时期（1961—2015年）相比，叶尔羌河未来3个SSPs情景下各个干旱特征变量（持续时间、干旱强度、干旱烈度、烈度峰值）的均值和中位数基本都呈上升趋势，未来干旱事件的持续时间、干旱强度、干旱烈度都将增大。

（3）与历史时期（1961—2015年）相比，未来3个SSPs情景下叶尔羌河流域2015—2100年SSP126、SSP245和SSP370情景下水文干旱发生的二维、三维联合概率都将呈下降趋势，同时干旱事件发生的重现期都将有不同程度的延长。温度升高引起的冰川积雪加速消融是叶尔羌河上游来水量增加的主要原因，虽然总体看来未来径流将呈增多趋势，水文干旱概率可能有所降低，但气候变化带来的不确定性增加将导致水文干旱事件强度等特征变量的增大，干旱程度可能较历史时期更为严重。

参考文献（References）

[1] Ahmed K, Shahid S, Nawaz N. Impacts of climate variability and change on seasonal drought characteristics of Pakistan[J]. Atmospheric Research, 2018, 214: 364-374.

[2] Damberg L A. Global trends and patterns of drought from space[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 117(3-4): 441-448.

[3] 周波涛, 钱进. IPCCAR6报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718. [Zhou Botao, Qian Jin. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718.]

[4] Dai A. Characteristics and trends in various forms of the Palmer drought severity index during 1900—2008[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116: D12115, doi: 10.1029/2010JD015541.

[5] Dai A. Drought under global warming: A review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.

[6] Oloruntade A J, Mohammad T A, Ghazali A H, et al. Analysis of meteorological and hydrological droughts in the Niger-South Basin, Nigeria[J]. Global and Planetary Change, 2017, 155: 225-233.

[7] 陈亚宁, 李玉朋, 李稚, 等. 全球气候变化对干旱区影响分析[J]. 地球科学进展, 2022, 37(2): 111-119. [Chen Yaning, Li Yupeng, Li Zhi, et al. Analysis of the impact of global climate change on dryland areas[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2): 111-119.]

[8] Taskiris G. Drought risk assessment and management[J]. Water Resources Management, 2017, 31(10): 3083-3095.

[9] Van L, Laaha G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 3-14.

[10] Williams A P, Seager R, Abatoglou J T, et al. Contribution of anthropogenic warming to California drought during 2012—2014[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(16): 6819-6828.

[11] 丁一汇. 构建全球气候变化早期预警和防御系统[J]. 可持续发展经济导刊, 2020, 11(增刊1): 44-45. [Ding Yihui. Build an early warning and defense system for global climate change[J]. China Sustainability Tribune, 2020, 11(Suppl. 1): 44-45.]

[12] 袁星, 马凤, 李华, 等. 全球变化背景下多尺度干旱过程及预测研究进展[J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 225-237. [Yuan Xing, Ma Feng, Li Hua, et al. A review on multi-scale drought processes and prediction under global change[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 43(1): 225-237.]

[13] 向燕芸, 王志成, 张辉, 等. 干旱区融雪径流模拟的研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 892-901. [Xiang Yanyun, Wang Zhicheng, Zhang Hui, et al. Study of snowmelt runoff simulation in arid regions: Progress and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 892-901.]

[14] Azmat M, Choi M, Kim T W, et al. Hydrological modeling to simulate streamflow under changing climate in a scarcely gauged cryosphere catchment[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 186, doi: 10.1007/s12665-015-5059-2.

[15] Xu H, Liu L, Wang Y, et al. Assessment of climate change impact and difference on the river runoff in four basins in China under 1.5 and 2.0 ℃ global warming[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(10): 4219-4231.

[16] Kong Q, Guerreiro S B, Blenkinsop S, et al. Increases in summertime concurrent drought and heatwave in eastern China[J]. Weather and Climate Extremes, 2020, 28: 100242, doi: 10.1016/j.wace.2019.100242.

[17] Laurent L, Buoncristiani J F, Pohl B, et al. Landscape pattern

change research of Yarkant irrigated area[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 10420, doi: 10.1038/s41598-020-67379-7.

[18] Han H, Wang R. Landscape pattern change research of Yarkant irrigated area[C]//International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resources Management. IEEE, 2012.

[19] 王晨鹏, 黄萌田, 翟盘茂. IPCC AR6 报告关于不同类型干旱变化研究的新进展与启示[J]. 气象学报, 2022, 80(1): 168-175. [Wang Chenpeng, Huang Mengtian, Zhai Panmao. New progress and enlightenment on different types of drought changes from IPCC Sixth Assessment Report[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2022, 80(1): 168-175.]

[20] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 455-456. [Zhou Tianjun, Zou Liwei, Chen Xiaolong. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)[J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 445-456.]

[21] Kan B, Su F, Xu B, et al. Generation of high mountain precipitation and temperature data for a quantitative assessment of flow regime in the upper Yarkant Basin in the Karakoram[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(16): 8462-8486.

[22] 刘蛟, 刘铁, 黄粤, 等. 基于遥感数据的叶尔羌河流域水文过程模拟与分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(6): 753-761. [Liu Jiao, Liu Tie, Huang Yue, et al. Simulation and analysis of the hydrological processes in the Yarkant River Basin based on remote sensing data[J]. Progress in Geography, 2017, 36(6): 753-761.]

[23] 任才, 龙爱华, 於嘉闻, 等. 气候与下垫面变化对叶尔羌河源流径流的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1373-1383. [Ren Cai, Long Aihua, Yu Jiawen, et al. Effects of climate and underlying surface changes on runoff of Yarkant River source[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1373-1383.]

[24] Xiang Y, Wang Y, Chen Y, et al. Impact of climate change on the hydrological regime of the Yarkant River Basin, China: An assessment using three SSP scenarios of CMIP6 GCMs[J]. Remote Sensing, 2021, 14(1): 115, doi: 10.3390/rs14010115.

[25] 田昊玮, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 博尔塔拉河源流区径流对气候变化的响应及预测[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1432-1442. [Tian Haowei, Chen Fulong, Long Aihua, et al. Response and prediction of runoff to climate change in the headwaters of the Bortala River [J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1432-1442.]

[26] 李昱, 席佳, 张弛, 等. 气候变化对澜湄流域气象水文干旱时空特性的影响[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 508-519. [Li Yu, Xi Jia, Zhang Chi, et al. Impact of climate change on the spatio-temporal characteristics of meteorological and hydrological drought over the Lancang-Mekong River Basin[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 508-519.]

[27] Xiang Y, Wang Y, Chen Y, et al. Hydrological drought risk assessment using a multidimensional Copula function approach in arid inland basins, China[J]. Water, 2020, 12(7): 1888, doi: 10.3390/w12071888.

[28] Sklar A. Fonctions de Repartition a n Dimensions et Leurs Marges [J]. Publications de l'Institut de statistique de l'Université de Paris, 1959(8): 229-231.

[29] Hao Z, Aghakouchak A, Nakhjiri N, et al. Global integrated drought monitoring and prediction system[J]. Science Data, 2014, 1: 140001, doi: 10.1038/sdata.2014.1.

[30] Bushra N, Trepanier J C, Rohli R V. Joint probability risk modelling of storm surge and cyclone wind along the coast of bay of Bengal using a statistical Copula[J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(11): 4206-4217.

[31] Das J, Jha S, Goyal M K. Non-stationary and Copula-based approach to assess the drought characteristics encompassing climate indices over the Himalayan states in India[J]. Journal of Hydrology, 2020, 580: 124356, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124356.

[32] Lü J Q, Shen B, Li H E. Dynamics of major hydro-climatic variables in the headwater catchment of the Tarim River Basin, Xinjiang, China[J]. Quaternary International, 2015, 380-381: 143-148.

[33] Gao X, Yang B S, Zhang S Q, et al. Glacier runoff variation and its influence on river runoff during 1961—2006 in the Tarim River Basin, China[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 40(5): 544-565.

[34] Duethmann D T, Bolch D, Farinotti D, et al. Attribution of streamflow trends in snow and glacier melt-dominated catchments of the Tarim River, Central Asia[J]. Water Resources Research, 2015, 51: 4727-4750.

[35] 张久丹, 李均力, 包安明, 等. 2013—2020年塔里木河流域胡杨林生态恢复成效评估[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1824-1835. [Zhang Jiudan, Li Junli, Bao Anming, et al. Effectiveness assessment of ecological restoration of *Populus euphratica* forest in the Tarim River Basin during 2013—2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1824-1835.]

Prediction of future hydrological drought risk in the Yarkant River Basin based on CMIP6 models

XIANG Yanyun[1], WANG Yi[2], CHEN Yaning[3], ZHANG Qifei[4], ZHANG Yujie[1]

(1. School of Public Administration, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

Abstract: Global warming has led to the increased frequency of extreme events such as droughts, posing significant threats to ecological security and sustainable socioeconomic development, particularly in arid regions, which are highly sensitive and responsive to climate changes. This paper employs the distributed hydrological model HEC-HMS, utilizing observed meteorological and hydrological data from basin stations and global climate model data from the Sixth International Coupled Model Intercomparison Program (CMIP6), to simulate and forecast the historical (1986—2014) and future (2015—2100) runoff trends and hydrological drought risks in the Yarkant River Basin (an essential tributary of the Tarim River), Xinjiang, China. The findings indicate that: (1) The HEC-HMS model is well-suited for arid basin areas. Under the three shared socioeconomic pathways (SSPs) scenarios, the runoff and standardized runoff index (SRI) in the Yarkant River Basin are projected to significantly increase ($P<0.1$), with the SRI growth rate estimated at approximately $0.13-0.27\cdot(10a)^{-1}$. (2) A comparative analysis of the marginal distributions of four drought characteristic variables in the basin for both historical and future periods reveals that the duration and intensity of future droughts will exceed those in the historical record, with a continuous rise in drought event magnitudes. (3) Moreover, the joint probability of future hydrological droughts in the Yarkant River Basin is expected to decrease relative to the historical period, leading to a prolonged return period for future droughts. The outcomes of this study offer valuable scientific references for water resource management and the development of strategies to mitigate hydrological drought risks in the basin.

Key words: hydrological drought; risk prediction; CMIP6; climate change